

Г.Ю.МАРТЫНЕНКО, канд.техн.наук; *Л.М.СКРЫНЬКА*;
М.М.СМИРНОВ, канд.техн.наук; НТУ «ХПИ»;
А.Д.ПИРОГОВ, ОАО «Сумское НПО им. М.В.Фрунзе»

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СНИЖЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАТКЕ ДЛЯ ЗАКАЛКИ ВАЛОВ

У роботі проведено дослідження з визначення можливості недопущення нагромадження залишкових пластичних деформацій у технологічному оснастці, що використовується для загартування валів. Показано, що термонапруження є причиною нагромадження залишкових деформацій. Запропоновано способи зниження рівня термонапружень за рахунок застосування термоізоляційних матеріалів.

In work the researches by definition of the barring opportunity of residual plastic accumulation deformations in technological equipment have been carried out which are used for shaft, rotors etc hardening. It is shown, that thermotensions are the reason of accumulation of residual deformations. The ways of the level thermotensions decreasing at the expense of application thermo-insulating materials have offered.

Введение. Технологическая оснастка при мелкосерийном и единичном производстве ложится серьезным бременем на себестоимость продукции. Особенно это касается термообработки металлоемких деталей [1,2]. Дело в том, что технологические операции при термообработке неизбежно подвергают элементы конструкции технологической оснастки разрушающему воздействию высоких температур с последующим резким охлаждением, что приводит к потере нужной геометрической формы за счет упругопластического деформирования и ползучести, появлению трещин и разрушению.

Конечно, можно было бы применить жаропрочные и коррозионностойкие стали, но такой путь приводит, зачастую, к такому повышению стоимости оснастки, которая становится соизмеримой со стоимостью самой детали, что совершенно недопустимо в современных экономических условиях.

Поэтому создание таких, по возможности многоцелевых конструкций технологической оснастки из относительно недорогих материалов, которые при прочих равных условиях имели бы максимальный ресурс при термоциклировании, является малоисследованным благодарным полем для инженеров-исследователей.

Осуществление технологического процесса термообработки длинномерных деталей, таких как валы роторов и т.д., предполагает использование шахтных печей, для помещения заготовки в которые используется специальная технологическая оснастка (рис. 1).

Процесс закалки стальных деталей или заготовок можно условно разделить на несколько этапов. На первом этапе заготовка крепится к оснастке и с помощью крана помещается в шахтную печь, в которой после ее разогрева до

определенной температуры выдерживается заданное время. Далее разогретая заготовка с помощью той же технологической оснастки транспортируется и помещается в емкость с маслом или водой для ее остывания. При этом существует две модификации техпроцесса: 1) заготовка при помещении ее в печь не отсоединяется от технологической оснастки, которая при этом также нагревается, 2) заготовка после помещения в печь отсоединяется от оснастки, а затем после нагрева и выдержки снова присоединяется для транспортировки.

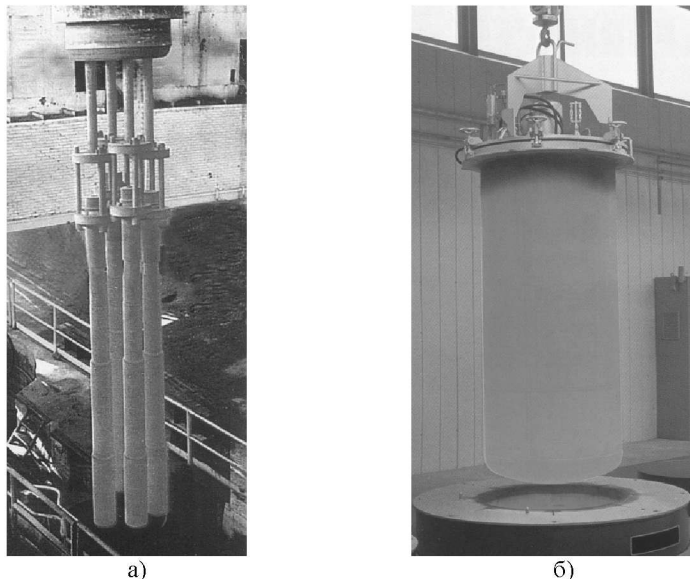


Рисунок 1 – Оснастка для термообработки деталей
(а – для закалки; б – для цементации [3])

На ОАО «Сумское НПО им. М.В. Фрунзе» в производстве закалка применяется для термообработки заготовок роторов турбомашин, валов и других длинномерных деталей. При этом используется вторая разновидность техпроцесса и несколько типов конструкции технологической оснастки (подвески), два из которых и являются предметом исследования (рис. 2 а, б).

Необходимость проведения исследований обусловлена тем, что в процессе эксплуатации оснастки происходит ее деформирование с накоплением остаточных деформаций, которое приводит к потере формы и невозможности дальнейшей эксплуатации (рис. 3). Справедливо предположить, что, так как нижняя часть подвески при разогреве находится длительное время в условиях высокой температуры, то причиной возникновения необратимых пластических деформаций является ползучесть.

1. Постановка задачи. В данной работе предлагается методика и исследе-

дустся причина возникновения и возможность снижения или недопущения накопления остаточных деформаций в процессе работы двух типов технологической оснастки, используемой для заковки заготовок валов, применяемых на ОАО «Сумское НПО им. М.В. Фрунзе».

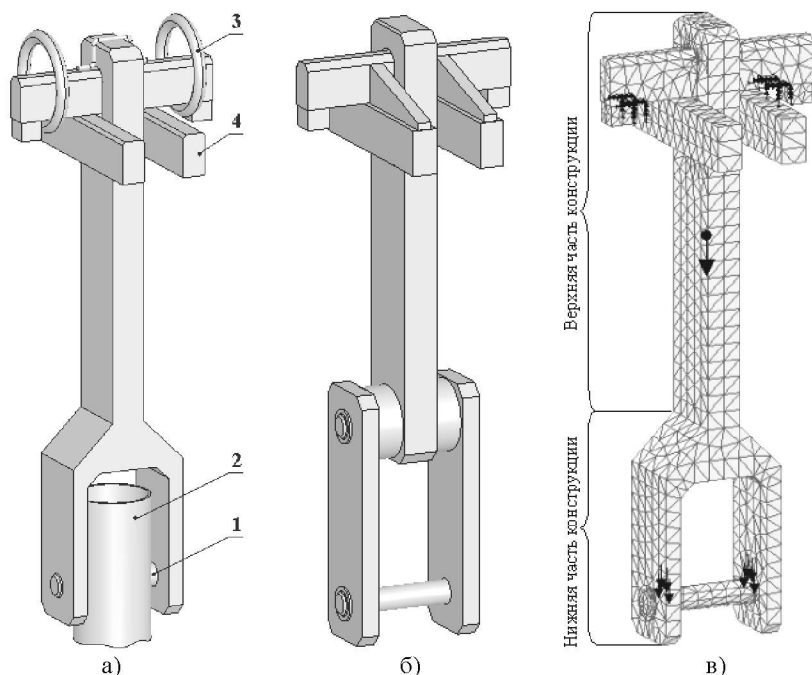


Рисунок 2 – Технологическая оснастка для заковки валов (а, б – первый и второй тип конструкции; в – расчетная модель и условное разделение конструкции)

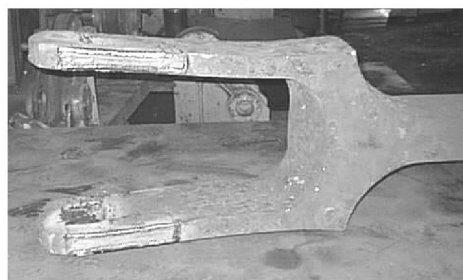


Рисунок 3 – Пример потери формы элемента оснастки при эксплуатации

Предлагаемым методом борьбы с накоплением остаточных деформаций является изменение технологического процесса заковки, а именно использование второго способа, при котором заготовка помещается в печь, после чего

отсоединяется от подвески. После разогрева до требуемой температуры заготовка снова крепится к подвеске и транспортируется с помощью крана к емкости с маслом для ее закалки.

Однако следует отметить, что применение такого способа возможно только для относительно коротких заготовок валов, труб и т.д., так как при установке, а не подвешивании в шахтную печь длинных заготовок, при разогреве их до температур закалки, возможна потеря прямолинейной формы за счет ползучести.

В таком случае работу технологической оснастки при закалке с момента разогрева заготовки до требуемой температуры можно условно разделить на три фазы (рис. 2а):

1. Горячая заготовка 2 соединяется с подвеской фиксирующим стальным пальцем 1;
2. Кран при помощи колец 3 переносит горячую заготовку от печи к емкости с маслом;
3. Заготовка и часть подвески опускается в масло, при помощи планок 4 подвеска устанавливается на емкость с маслом.

При этом возникает вопрос, каким образом изменение технологического процесса повлияет на работоспособность конструкции при ее многократном использовании.

Ответ можно определить, если располагать информацией о напряженно-деформированном состоянии конструкции во всем диапазоне времени от выемки заготовки из печи до момента ее остывания (закалки) в емкости с маслом с учетом распределения температуры и установить факт и причину возникновения остаточных деформаций.

Напряженно-деформированное состояние может быть определено решением задач нестационарной теплопроводности и термоупругости [4] в конечно-элементной постановке [5,6], в которых будет смоделирован предполагаемый технологический процесс.

2. Расчетная схема и модель. Для задачи статики механическое закрепление конструкции осуществляется в местах крепления колец крана, нагружения включают в себя однонаправленное давление, приложенное на палец, эквивалентное весу трубы, и собственный вес конструкции (рис. 2 в). Граничные условия тепловых задач прикладываются в соответствии с фазами работы конструкции, при этом конструкция условно разделяется на верхнюю и нижнюю часть (рис. 2 в). При этом тепловые граничные условия, соответствующие второй фазе – на верхнюю часть прикладывается температура, равная температуре окружающей среды, а нижняя находится в условии конвективного теплообмена с воздухом. Тепловые граничные условия, соответствующие третьей фазе – верхняя часть находится в условии конвективного теплообмена с воздухом, нижняя – с маслом. В обоих случаях на палец прикладывается температура, равная температуре заготовки, при выеме ее из печи.

Для того, чтобы расчетная модель адекватно отображала реальную си-

туацию в плане теплопередачи между элементами конструкции при подвешенной трубе, а также обеспечивала возможность механического взаимосмещения щек, шайб и пальцев и жесткость конструкции в местах крепления этих элементов конструкции друг к другу, расчетная модель выполнена как сборка, в которой зазоры между деталями заполнены модельными материалами: первый – с тепловыми характеристиками воздуха, и специально назначенными механическими, а именно модулем упругости на несколько порядков ниже, чем у стали (для обеспечения возможности взаимосмещения деталей); второй материал – с тепловыми характеристиками стали, а механическими воздуха (для корректной передачи тепла) см. рис. 4.

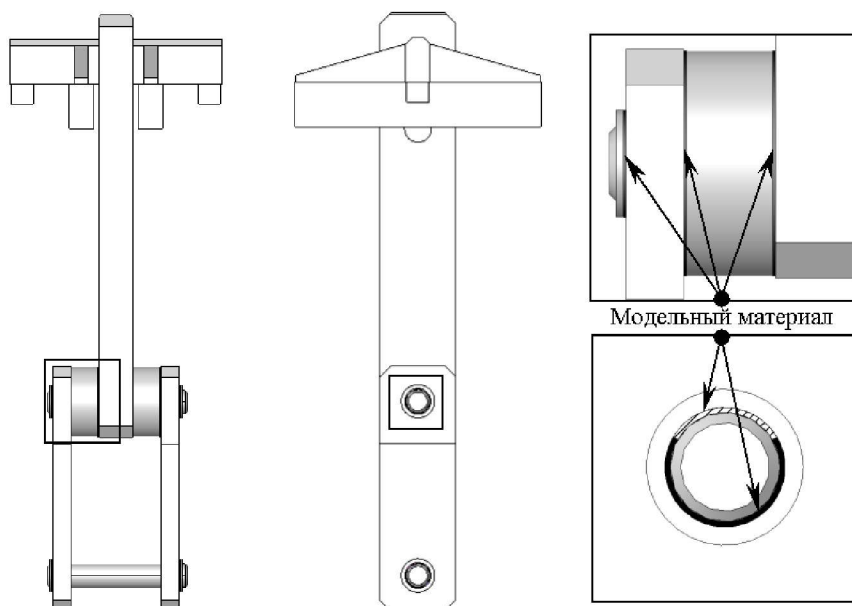


Рисунок 4 – Области размещения модельных материалов

3. Численные исследования. На начальном этапе были проведены расчетные исследования с целью выбора более предпочтительного варианта конструкции из двух (рис. 2 а, б) для проведения в дальнейшем подробного анализа поведения конструкции в условиях нестационарного теплообмена, а также определения причин возникновения больших значений напряжений.

На основе статических расчетов в линейно-упругой постановке определено, что для первого типа конструкции зоны максимальных напряжений располагаются в месте перехода корпуса от стержня прямоугольного поперечного сечения в вилку (рис. 5 а). Зоны максимальных напряжений и их величины свидетельствуют о нерациональном распределении жесткостных параметров данного типа конструкции, что в большей степени и приводит к возникнове-

нию пластических деформаций в данных зонах.

Во втором типе конструкции в данных областях уровень напряжений ниже, так как за счет подвижного крепления щек к штанге с помощью верхнего пальца жесткость снижена. Перераспределение жесткостных параметров приводит к смене местоположения областей максимальных напряжений и перемещению их на палец и места крепления пальца и щек (рис. 5 б).

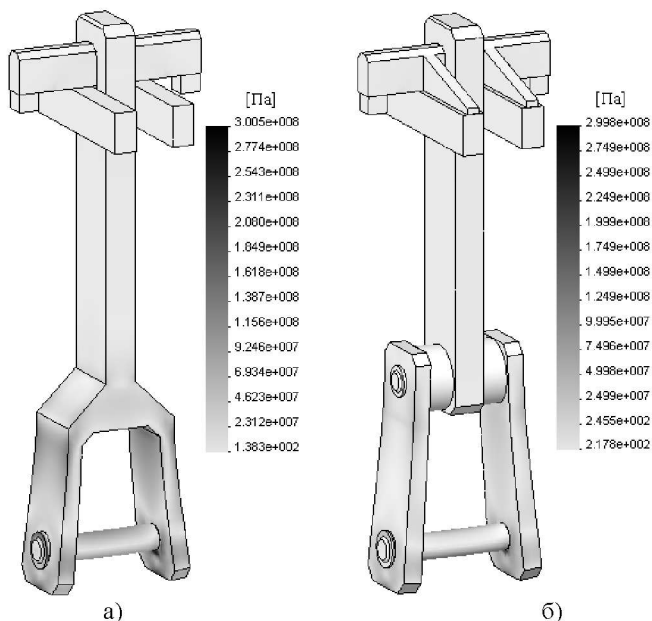


Рисунок 5 – Решение задачи термоупругости в линейно-упругой постановке – напряженное состояние (а – конструкция первого типа; б – конструкция второго типа)

Сравнение решений задач с учетом температурного распределения (рис. 5) и без (рис. 6) позволило определить, что термонапряжения вносят существенный вклад в общую картину напряженного состояния, в значительной степени из-за больших значений термоградиента. Отсюда следует, что от того, насколько правильно определены максимальные значения температур и их градиентов, зависит точность определения напряженного состояния и выводы о работоспособности конструкции.

Дальнейшему анализу подвергалась конструкция второго типа (рис. 2 б). На начальном этапе исследования в качестве термонагрузок в задачах термоупругости задавались распределения температур, соответствующие решениям стационарных задач теплопроводности, однако, максимальные значения градиента температуры могут наблюдаться не в стационарном решении, а в некоторый момент времени работы конструкции, которая характеризуется переменным во времени распределением температуры,

обусловленным также и сменой тепловых граничных условий. Поэтому вторая часть расчетных исследований посвящена решению задачи нестационарной теплопроводности, моделирующей процесс второй и третьей фазы работы конструкции.

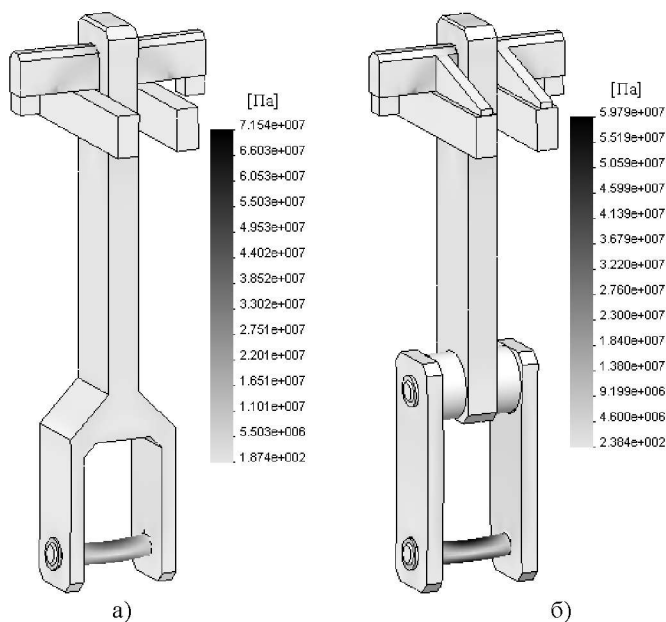


Рисунок 6 – Решение задачи статики в линейно-упругой постановке без учета распределения температуры – напряженное состояние (а – конструкция первого типа; б – конструкция второго типа)

Поставленная задача выполнялась путем последовательного решения задач теплопроводности и термоупругости. Этот способ предполагает на **первом этапе** решение задачи нестационарной теплопроводности с учетом изменения в некоторые моменты времени граничных условий, а на **втором** – решение задачи термоупругости, т.е. проведение статических анализов с учетом механических граничных условий и распределения температуры в моменты времени, соответствующие каждому шагу решения задачи нестационарной теплопроводности, полученного на первом этапе.

Исходя из того, что наибольший интерес представляют моменты времени, в которые температурный градиент имеет максимальное значение, а значит, в эти же моменты ожидаются наибольшие термонапряжения, выполнение второго этапа производилось только с использованием тех шагов решения задачи нестационарной теплопроводности, которые отвечают указанным требованиям.

Ранее определено, что самым опасным является напряженное состоя-

ние нижнего пальца и щек, в местах их соединения. Для определения моментов времени, в которые температурный градиент имеет наибольшее значение, построены графики изменения температуры во времени (рис. 7) в близко расположенных точках (рис. 8) на нижнем пальце и щеках. Эти моменты времени (t_1 - t_6) показаны вертикальными пунктирными линиями (рис. 7).

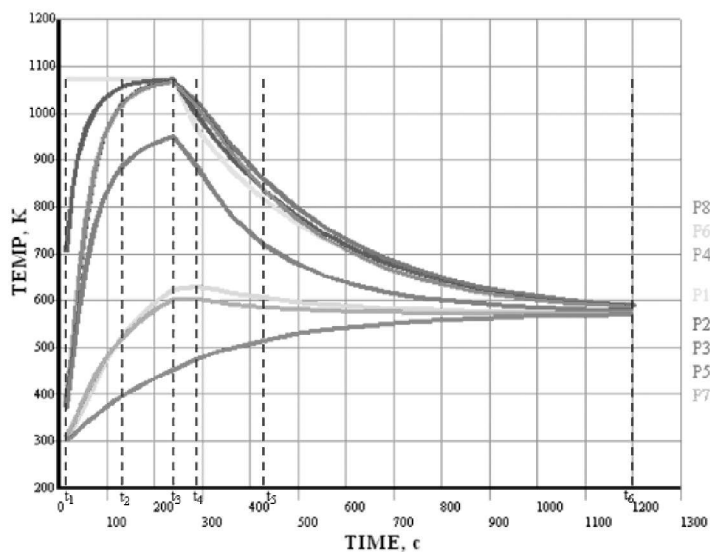


Рисунок 7 – Изменение температуры во времени в точках P1-P8

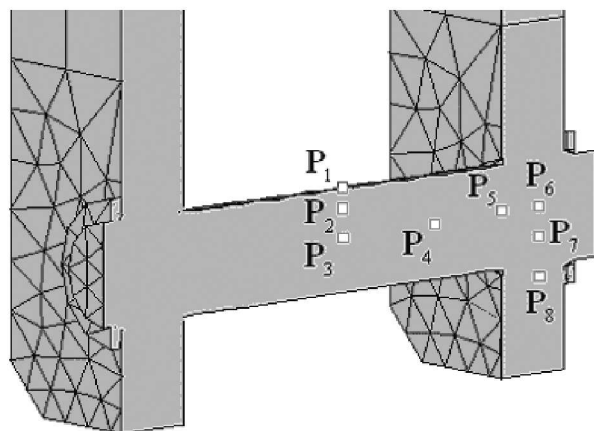


Рисунок 8 – Контрольные точки

При решении задачи термоупругости распределение температуры, соот-

ветствующее моментам времени ($t_1 - t_0$), задавалось как нагрузка в задаче статики в линейно-упругой постановке.

Также для элементов конструкции было учтено, что модуль упругости материала зависит от температуры (рис. 9), а при оценке результатов (рис. 10 – 13) учитывалась еще и зависимость предела текучести от температуры [7].

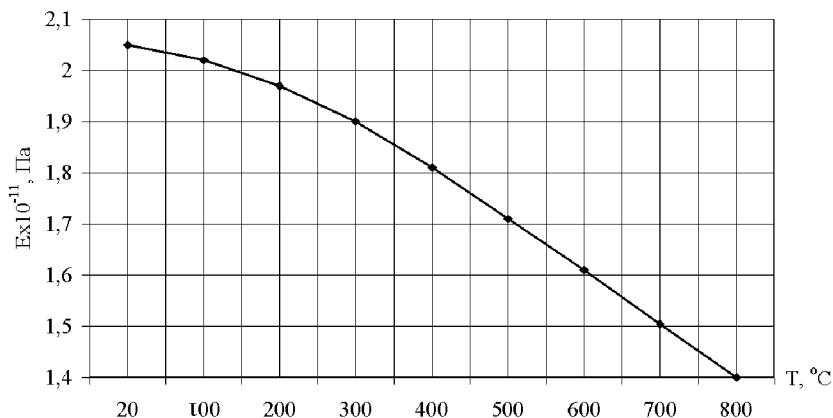


Рисунок 9 – Зависимость модуля упругости стали 12Х18Н10Т от температуры

Анализ напряженного состояния позволил сделать вывод, что и при изменении технологического процесса не исключена возможность возникновения и накопления остаточных пластических деформаций в процессе работы конструкции, причиной которых являются термонапряжения. Поэтому, только если уровень термонапряжений будет значительно снижен, то возможна работа конструкции в упругой области (рис. 6 б).

Заключение. Так как причиной термонапряжений является значительный температурный градиент, то одним из возможных способов снижения их значений, а значит и снижения остаточных деформаций, есть термоизоляция конструкции от источника повышенных температур, то есть заготовки трубы или вала, с помощью применения термоизоляционных материалов. Так возникает предложение – покрыть палец термоизоляцией на том отрезке, где он соприкасается с горячей заготовкой, как показано на рис. 14 а, в качестве которой может быть выбран, например, керамический фарфор.

Исследование данного предположения было выполнено путем решения задачи нестационарной теплопроводности. Результаты решения в момент времени, соответствующий смене второй и третьей фаз работы конструкции (рис. 14 б), свидетельствуют о том, что большой градиент возникает только в области изоляционного материала, что не представляет опасности.

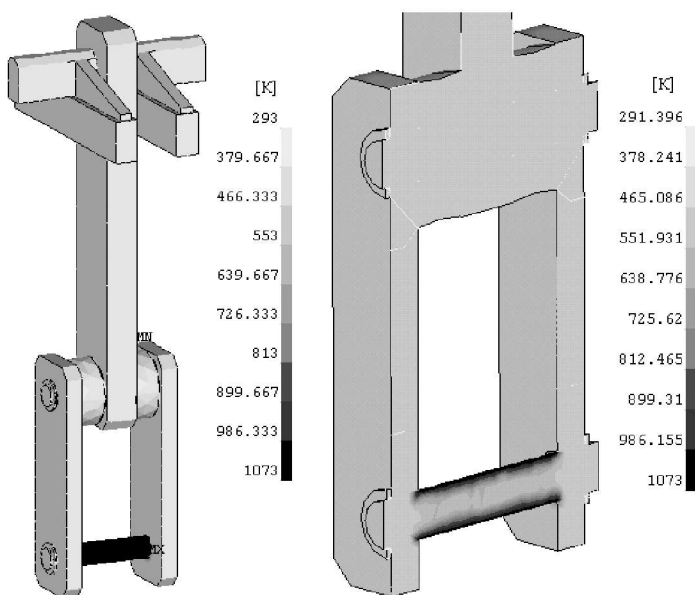


Рисунок 10 – Распределение температуры в момент времени $t_1 = 16$ с

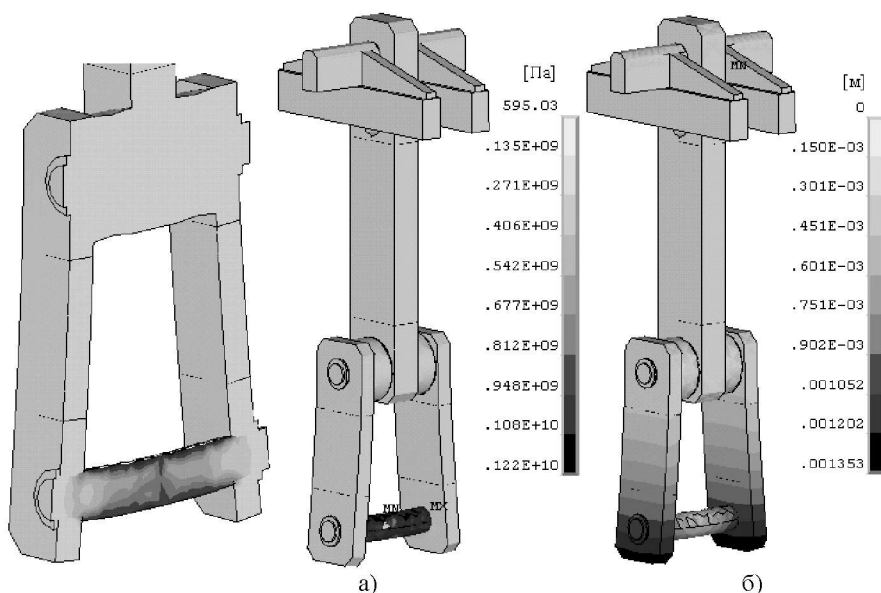


Рисунок 11 – Напряженно-деформированное состояние в момент времени $t_1=16$ с
(а – напряжения по критерию Мизеса; б – суммарные перемещения)

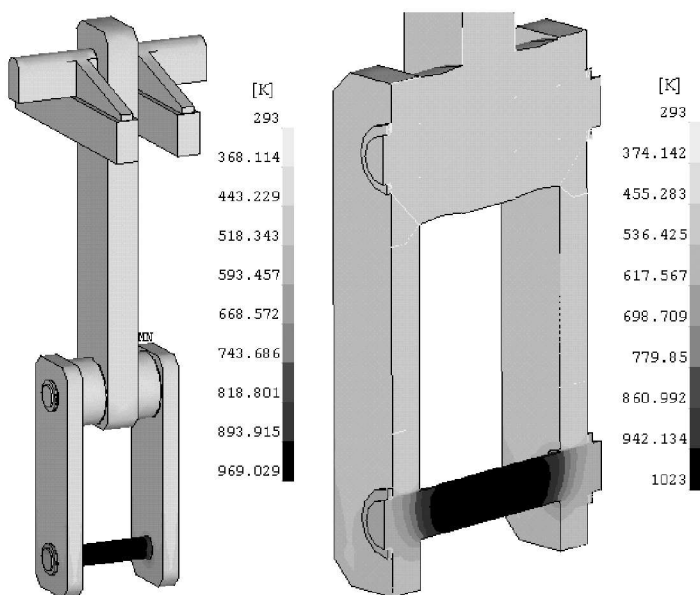


Рисунок 12 – Распределение температуры в момент времени $t_4 = 288$ с

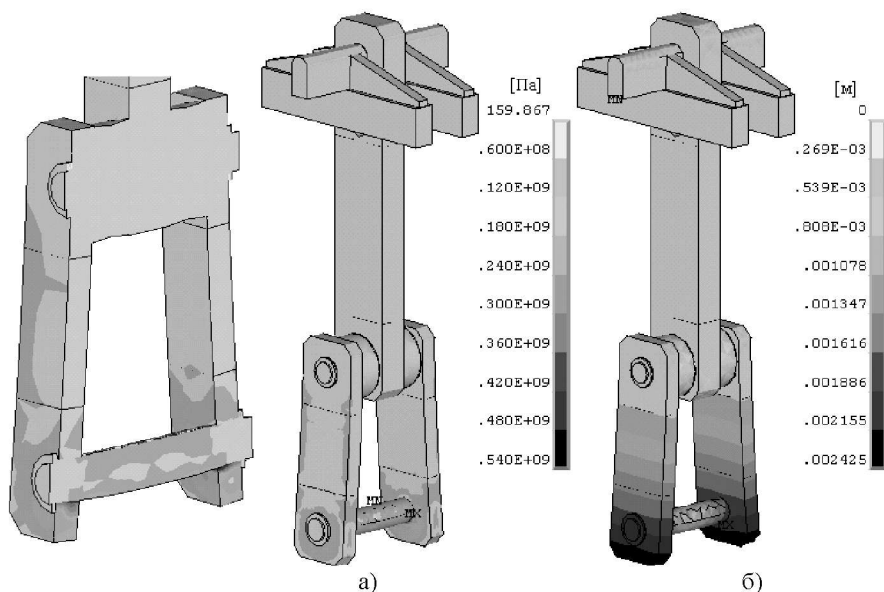


Рисунок 13 – Напряженно-деформированное состояние в момент времени $t_4=288$ с
(а – напряжения по критерию Мизеса; б – суммарные перемещения)

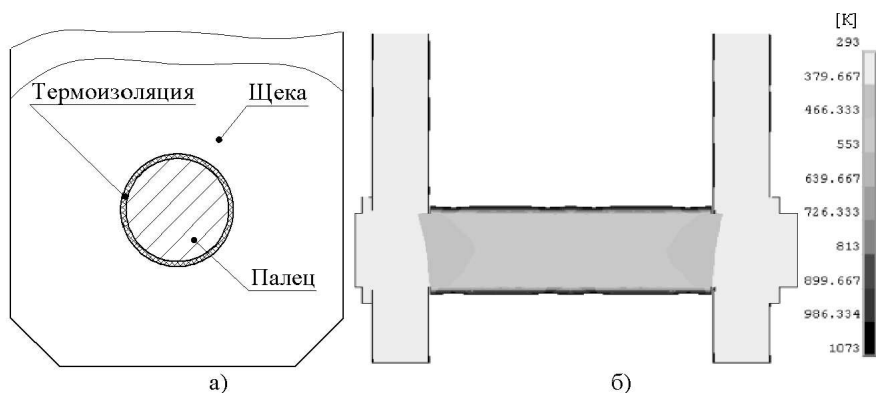


Рисунок 14 – Применение термоизоляционного материала
(а – схема; б – решение задачи теплопроводности)

Список литературы: 1. Справочник металлста. В 5-ти т. Т.1. // Под ред. С.А.Чернавского и В.Ф.Реицкова. – М.: Машиностроение, 1976. – 768 с. 2. URL: <http://www.kombat.com.ua/> (Термическая обработка стали). 3. Heat processing technology and industrial furnaces. Рекламный проспект Swiss Association of Machinery Manufacturers (VSM). Published by the «Industrial Furnace Group» of the VSM, Kirchenweg 4, CH-8032 Zurich-Switzerland. 4. Коваленко А.Д. Термоупругость. – К.: Вища школа, 1975. – 216 с. 5. В.И.Мяченков, В.П.Мальцев и др. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов: Справочник / Под общ. ред. В.И.Мяченкова. – М.: Машиностроение, 1989. – 520 с. 6. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с. 7. Гохфельд Д.А., Гецов Л.Б. и др. Механические свойства сталей и сплавов при нестационарном нагружении. Справочник. – Екатеринбург: УрО РАН, 1996. – 405 с.

Поступила в редколлегию 10.05.2006

УДК 534; 629.113

Ю.В.МИХЛИН, докт. физ.-мат. наук; **С.Г.МИТРОХИН**, НТУ «ХПИ»

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ АВТОМОБИЛЯ МЕТОДОМ НОРМАЛЬНЫХ ФОРМ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРУЖИН ПОДВЕСКИ

В роботі проведено дослідження свободних загасаючих коливань у автомобілі з нелінійною характеристикою підвіски. Розглянуто нелінійну модель з 7 степенями волі. В результаті дослідження отримано нелінійні форми коливань і відповідні скелетні криві. Описані перехідні процеси у системі. Отримані результати порівняно з рішеннями лінеаризованої системи.

Free damped oscillations in the automobile with a nonlinear response of the suspension are considered. The 7-DOF nonlinear model is considered. As a result, nonlinear vibration modes and the corresponding skeleton curves are obtained. The transient is described in this system. The obtained results are compared with solutions of the corresponding linearized system.